



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY – MINULOST,  
SOUČASNOST A BUDOUCNOST**

WIND POWER – THE PAST, THE PRESENCE AND THE FUTURE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Vítězslav Kučera

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Charvát, Ph.D.

BRNO 2018



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Vítězslav Kučera**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Charvát, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Větrné elektrárny – minulost, současnost a budoucnost**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Energii větru využívá lidstvo po tisíceletí. Od pohonu plavidel přes pohon větrných mlýnů dospělo využití energie větru až k výrobě elektrické energie. Vítr se tak stal jedním z nejrozšířenějších obnovitelných zdrojů energie. Větrné elektrárny prošly za dobu svého použití mohutným technologickým vývojem. Tento vývoj je předmětem této bakalářské práce.

### **Cíle bakalářské práce:**

Provést rešerši historie a současného stavu v oblasti výroby elektrické energie využitím větru. Zhodnotit možnosti využití energie větru jako zdroje energie pro budoucnost. Součástí práce bude celoroční simulace provozu větrné elektrárny.

### **Seznam doporučené literatury:**

SATHYAJITH, M. Wind energy: fundamentals, resource analysis, and economics. New York: Springer, c2006. ISBN 978-3-540-30905-5.

STIEBLER, M. Wind energy systems for electric power generation. Berlin: Springer, c2008. Green energy and technology. ISBN 978-3-540-68762-7.

BROWN, Lester R., Janet LARSEN, J. Matthew. RONEY a Emily E. ADAMS. The great transition: shifting from fossil fuels to solar and wind energy. New York: W.W. Norton & Company, 2015. ISBN 978-0-393-35055-5.

MOORE, Ted R. a Eward I. BAILEY. Wind power: systems engineering applications and design models. Hauppauge, N.Y.: Nova Science Publishers, c2012. Energy science, engineering and technology series. ISBN 9781620817872.

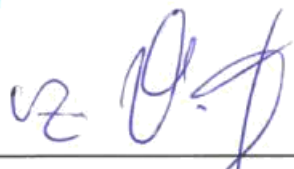
CRUZ, Joao a Mairead ATCHESON, ed. Floating offshore wind energy. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-319-29396-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 11. 10. 2017

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katoňický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem větrných elektráren od minulosti po současnost, a také se zaměřuje na vývoj větrných elektráren v budoucnosti. V první části této práce jsou uvedeny počátky využití větrné energie a je zde zmíněna první větrná elektrárna. Části větrné elektrárny a její konstrukce jsou popsány v další části, kde je také popsán současný stav větrných elektráren v ČR a ve světě. Dále jsou v této práci představeny nové koncepty větrné energetiky v budoucnosti. V závěru práce je provedena roční simulace provozu větrné elektrárny.

### **Klíčová slova**

Větrná energie, větrné elektrárny, části větrné elektrárny, simulace

## **ABSTRACT**

This Bachelor's thesis deals with the evolution of wind turbines from the past to present and also concentrates on the evolution of wind turbines in the future. In first part the beginnings of wind energy use are given, and the first wind turbine is mentioned. Further, the parts of wind turbine and its construction are described in next part, where the current state of wind turbines in the Czech Republic and in the world is presented. New concepts of wind energy are introduced. Finally, last part performs wind turbine simulation over the span of one year.

### **Key words**

Wind energy, wind turbine, construction of wind turbine, simulation

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KUČERA, V. *Větrné elektrárny – minulost, současnost a budoucnost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 49 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Charvát, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Větrné elektrárny – minulost, současnost a budoucnost** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Jméno a příjmení

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto doc. Ing. Pavlu Charvátovi, Ph.D za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

---

podpis



## OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Historie .....	12
1.1 Plachetnice .....	12
1.2 Větrné mlýny a čerpadla .....	12
1.3 První větrná elektrárna .....	13
2 Základní princip VtE .....	14
2.1 Základní rozdělení proudění vzduchu.....	14
2.2 Vliv lokality .....	14
2.3 Výkon VtE .....	15
2.4 Betzovo pravidlo.....	15
2.5 Koeficient ročního využití .....	15
3 Rozdělení větrných motorů .....	16
3.1 Dělení podle aerodynamického principu .....	16
3.1.1 Větrné motory odporové .....	16
3.1.2 Větrné motory vztahové.....	17
3.2 Rozdělení podle orientace hřídele.....	19
3.2.1 Horizontální osa rotace.....	19
3.2.2 Vertikální osa rotace.....	19
4 Základní části konstrukce VtE.....	21
4.1 Rotor .....	21
4.2 Regulace.....	22
4.2.1 Stall.....	22
4.2.1 Pitch.....	22
4.2.1 Active Stall.....	22
4.3 Brzda rotoru .....	23
4.4 Převodovka .....	23
4.5 Generátor .....	24
4.5.1 Asynchronní generátor .....	24
4.5.2 Synchronní generátor .....	25
4.6 Stožár .....	26
4.7 Základy .....	27
5 Současnost .....	28

5.1	Větrná energetika v České republice .....	28
5.2	Větrná energetika ve světě .....	30
6	Budoucnost VtE .....	32
6.1	Překážky spojené se zvyšováním podílu produkce energie z VtE .....	32
6.2	Nové koncepty ve větrné energetice .....	32
7	Roční simulace VtE .....	34
	DISKUSE.....	40
	ZÁVĚR .....	41
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	42
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	45
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	46
	SEZNAM TABULEK.....	47
	SEZNAM GRAFŮ.....	48
	SEZNAM PŘÍLOH.....	49

## ÚVOD

Postupem času se snižují zásoby fosilních paliv, a zároveň se zvyšujícím se počtem obyvatel roste i energetický nárok jednotlivců po celém světě. Současný trend spotřeby elektrické energie má negativní vliv na světové hospodářství i na globální klima. V blízké budoucnosti nárok na energii nadále poroste. Tento růst zapříčiní vyčerpání zejména fosilních zdrojů energie, které mají využití také v chemickém průmyslu. Z těchto důvodů se energetika využívající obnovitelné zdroje (např. větrné elektrárny) rychle rozvíjí.

Vítr vzniká v důsledku nerovnoměrného ohřívání země působením slunečního záření. Od ohřátého zemského povrchu se sáláním ohřívá přiléhající vrstva vzduchu. Teplý vzduch je lehčí, a proto má tendenci stoupat vzhůru. Vzniknou tak místa s rozdílnou teplotou a tlakem. Vítr je proudění od tlakové výše k tlakové níži, které se snaží tyto rozdíly vyrovnat. Celý děj je ovlivněn rotací země a střídáním dne a noci.

Větrná energetika využívá energii větru k výrobě elektrické energie. V minulosti energii větru využívali plachetnice a větrné mlýny. První větrné elektrárny byly vybudovány v 19. století. Základním principem větrné elektrárny je přeměna mechanické energie větru na elektrickou energii. Základními součástmi větrné elektrárny jsou stožár, gondola a větrný motor.

Pro hodnocení správného místa instalace se počítá rychlost větru v daném místě, výkon větrného motoru a množství vyrobené energie. Větrné elektrárny nevyrábějí energii pořád, ale jejich běh závisí na rychlosti větru. Pokud je rychlost větru příliš nízká nebo příliš vysoká je větrná elektrárna odstavena z provozu.

V České republice je celkový instalovaný výkon větrných elektráren nízký. Proto je také procento celkově vyrobené energie větrnými elektrárnami velmi nízké. Zemí, která má nejvyšší instalovaný výkon je Čína, kde je také největší přírůstek nově instalovaného výkonu větrné elektrárny.

K roční simulaci větrné elektrárny jsou použita meteorologická data pro lokalitu severně od města Peterhead ze Skotska. Data budou analyzována a bude určen koeficient ročního využití, který bude následně porovnán s větrnou farmou Hywind.

## 1 Historie

V minulosti byla energie větru využívána k přímé přeměně na mechanickou práci. Příkladem mohou být plachetnice, které využívají vítr k transportu. Na souši to jsou zejména větrné mlýny, které mlely obilí a tzv. farmářská kola, která čerpala vodu. Všechny tyto příklady prošly postupem času určitým vývojem, přesto s příchodem nových technologií, které vedly k rychlému vývoji nových strojů, se některé z nich staly nepraktickými a dnes se už téměř nepoužívají.

### 1.1 Plachetnice

Vůbec první využití energie větru se připisuje vynálezu plachetnic. První zmínky o plachetnicích pocházejí z roku 4 000 př. n. l. z Indonésie [1]. První plachetnice odebíraly kinetickou energii větru za pomoci odporového principu. Tento princip využívá síly, která vzniká aerodynamickým odporem vzduchu. Tento odpor působí na plachtu, která je namířena kolmo proti směru větru. Postupem času se plachetnice zdokonalovaly. Začaly se stavět plachetnice fungující na vztakovém principu, který plachetnicím, mimo schopnost plout kolmo na směr větru, umožnil plout větší rychlostí a také křížovat proti směru větru.



Obrázek 1 Plachetnice odporová (nalevo) a vztaková (napravo) [2] [3].

### 1.2 Větrné mlýny a čerpadla

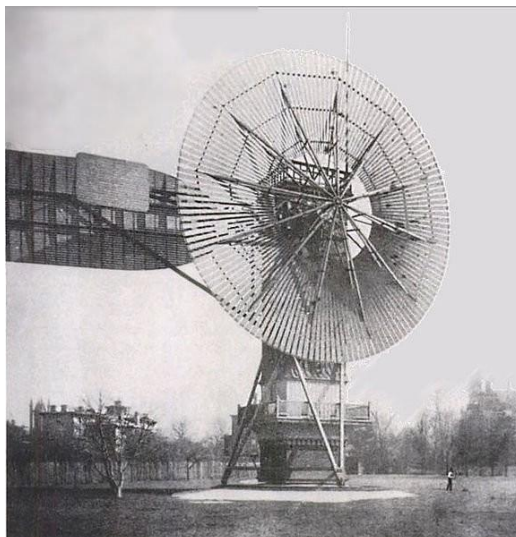
O přesném datu vzniku větrných mlýnů se nedochovaly žádné dokumenty. První zmínky o využívání energie větru pochází z Babylonie. Babylonský císař plánoval využít energii větru k zavlažování [4].

Nejstarší zdokumentovaný návrh větrného mlýnu pochází z roku 200 před Kristem. Peršané tehdy používali sílu větru k mletí obilí. Tyto mlýny měly vertikální osu rotoru a plachty byly tvořeny ze svazků rákosu nebo dřeva [1].

V Evropě byly větrné mlýny populární od 13. století, a to zejména ve Francii, Holandsku a Velké Británii. Na rozdíl od větrných mlýnů v Persii měly osu rotoru uloženou horizontálně. Věže měly tvar kruhu nebo polygonu. Stavební materiál pro věže bylo dřevo a cihly. Tehdejší mlýny byly vybaveny směrovkou, která natáčela mlýn proti větru. Při silném větru bylo potřeba mlýny odstavit, aby nedošlo k poškození. K odstavení mlýnu se používaly zejména dvě metody, a to natočení mlýnu kolmo na směr větru, nebo stažení plachet z lopatek rotoru [1].

### 1.3 První větrná elektrárna

Vynález větrné elektrárny se připisuje dvěma mužům. Na americké kontinentě to byl Američan Charles F. Brush, který v letech 1887-1888 sestrojil první automatickou turbínu napojenou na generátor elektrického proudu. Rotor byl složen z 144 paprskovitě uspořádaných lopatek z cedrového dřeva a měl průměr 17 m. Výkon generátoru byl 12 KW při otáčkách 500 ot/min [1].



Obrázek 2 VtE Charlese F. Brushe [5].

První větrná elektrárna (dále VtE) na evropském kontinentě vyrostla roku 1891. Zasloužil se o ni dánský profesor lidové univerzity Poul la Cour. Tato VtE měla čtyři až šest lopatek tvořených plachtami natáhnutými na rámové konstrukci. Poul la Cour se zabýval i akumulací elektrické energie. Roku 1900 postavil stroj, který využíval energii z VtE na výrobu vodíku elektrolýzou vody. Dalším jeho vynálezem byla svítidla, v nichž se svítilo pomocí vodíku [1].



Obrázek 3 VtE Paula la Coura [6].

## 2 Základní princip VtE

### 2.1 Základní rozdělení proudění vzduchu

Existují dva základní typy proudění a tím je laminární a turbulentní. Laminární proudění je takové, ve kterém se vrstvy s rozdílnou rychlostí proudění vzájemně posouvají bez tvoření vírů. To znamená že se vzájemně nepromíchávají. S rostoucí výškou roste i rychlost proudění.

Turbulentní proudění je oproti laminárnímu více či méně vířivé. Vzniká zde tzv. proudové pole, kde se molekuly vzduchu posouvají nejen paralelně. Turbulentní složky nelze měřit miskovým anemometrem. VtE pracují v proudění, které je minimálně turbulentní [7].

### 2.2 Vliv lokality

K instalaci VtE je potřeba vhodná lokalita s průměrnou roční rychlostí větru od 6 m/s a výše. Před instalací VtE je potřeba, aby v dané lokalitě byl postaven stožár, který by měřil rychlost větru ve výšce instalace po určitou dobu. Tato metoda by byla velmi nákladná a zdoluhavá, a proto se využívá dat z blízké meteostanice a rychlost větru v požadované výšce se odhaduje.

Většina meteostanic měří rychlost větru ve výšce 10 metrů nad zemí. Hodnota rychlosti větru se s rostoucí výškou zvětšuje. K odhadu rychlosti větru ve výšce instalace lze použít vzorec [7].

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^a \quad \text{Rov.2.1}$$

Kde  $v_2$  je rychlost větru v požadované výšce,  $v_1$  počáteční rychlost naměřená ve výšce  $h_1$  a exponent  $a$  závisí na drsnosti povrchu země.

Závislost exponentu  $a$  na drsnosti povrchu krajiny je popsána v tabulce (1), kterou definovali dánští výzkumníci v dánské národní laboratoři RISO. Tabulka pracuje s hodnotami, které můžeme očekávat pro stožár vysoký 50 m [7].

Třída drsnosti	Charakter krajiny	Délka Nerovností[m]	Exponent a [-]
0	Otevřené pobřeží bez jakýchkoliv překážek s větrem směřujícím na pobřeží	0,001	0,12
1	Otevřená krajina s ojedinělými volně stojícími keři a stromy (pobřeží, prerie)	0,01	0,15
2	Zemědělská krajina s rozptýlenými budovami a křovinami	0,05	0,18
3	Uzavřená krajina s porostem stromů, mnoha křovinami a sousedícími budovami	0,03	0,24

Tabulka 1 Krajiny popsané třídou drsnosti, délkou nerovností a exponentem  $a$  [7].

Drsnost povrchu ovlivňuje rychlost větru. Například pokud je vegetace nezanedbatelné výšky  $h_v$  (například hustý les), potom neleží nulový bod rychlosti profilu na povrchu země, ale v 75% výšce vegetace ( $0,75h_v$ ) [7].

Dalším nepříznivým faktorem je zástavba. Hranaté budovy při rychlosti větru 10 m/s mohou způsobovat turbulence, které mohou být až dvakrát větší, než je výška budovy a dvacetkrát delší, než je délka budovy [7].

### 2.3 Výkon VtE

Výkon VtE se vypočítá podle rovnice (2.2)

$$P = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \cdot c_p \quad \text{Rov.2.2}$$

Kde  $S$  je plocha rotoru v  $m^2$ ,  $\rho$  je hustota vzduchu v  $kg/m^3$ ,  $v$  je rychlost větru před VtE v  $m/s$  a  $c_p$  je součinitel výkonosti, který jednotku nemá.

### 2.4 Betzovo pravidlo

Alber Betz při studii teorie větrem poháněných strojů zformuloval pravidlo, které udává, jaké maximální množství elektrické energie lze získat z energie větru. Součinitel výkonosti  $c_p$  tedy udává, kolik energie z proudícího vzduchu se využívá na turbíně. Maximální hodnota součinitele výkonosti  $c_p = 0,593$ . To znamená, že lze z větru odebrat maximálně 59,3 % pomocí větrného motoru. V současnosti je maximální hodnota součinitele výkonosti v rozmezí mezi 0,4 až 0,5, což představuje 70 až 80 % teoreticky možného součinitele výkonosti. Součinitel výkonosti není konstantní, ale je funkcí rychlosti větru [4] [8].

### 2.5 Koeficient ročního využití

Jedním z ukazatelů efektivity energetického zdroje je koeficient ročního využití výkonu. Hodnoty tohoto koeficientu se obvykle vyjadřují v procentech a udávají nakolik je během roku využit instalovaný výkon. Výpočet koeficientu  $k_r$  je uveden v rovnici (2.3).

$$k_r = \frac{W_r}{P_i \cdot h} \quad \text{Rov.2.3}$$

Kde  $W_r$  je množství vyrobené energie za rok,  $P_i$  je instalovaný výkon a  $h$  je počet hodin v roce.

Koeficient ročního využití by se měl pohybovat alespoň mezi 25 až 40 %. Při hodnotách vyšších než 40 % je instalovaná VtE vysoce účinná, závisí ovšem na geografických podmínkách. Například turbíny instalované v mořích zpravidla dosahují větší hodnot než ty na pevnině. Plovoucí větrná farma Hywind u pobřeží Skotska dosáhla v prvním čtvrtletí (listopad – leden) hodnoty 65 % koeficientu ročního využití [9].

Na rozdíl od VtE dosahují jaderné elektrárny až dvojnásobných hodnot koeficientu ročního využití. Například největší jaderná elektrárna Paulo Verde nacházející se ve Spojených Státech v roce 2010 dosáhla koeficientu ročního využití 90,4 %, z čehož plyne že pro výrobu stejného množství energie z VtE je potřeba vyšší (až dvojnásobný) instalovaný výkon VtE, než u jaderné elektrárny [10].

### 3 Rozdělení větrných motorů

Větrné motory jsou zařízení přeměňující kinetickou energii větru na mechanickou energii. Ve VtE je následně mechanická energie transformována na elektrickou energii.

#### 3.1 Dělení podle aerodynamického principu

Podle aerodynamického principu můžeme dělit větrné motory do dvou kategorií. První kategorií jsou motory odporové a druhou kategorií jsou motory vztahové.

##### 3.1.1 Větrné motory odporové

Pracují na principu aerodynamického odporu, který vznikne působením větru na plochu. Na této ploše se vytváří síla, která se mechanicky přemění na rotační pohyb. K dosažení hnacího kroutícího momentu je potřeba, aby obvodová rychlost byla menší než rychlost větru. Bez odběru energie z hřídele jsou otáčky úměrné rychlosti větru. Toho se dá využít například pro měření rychlosti větru.

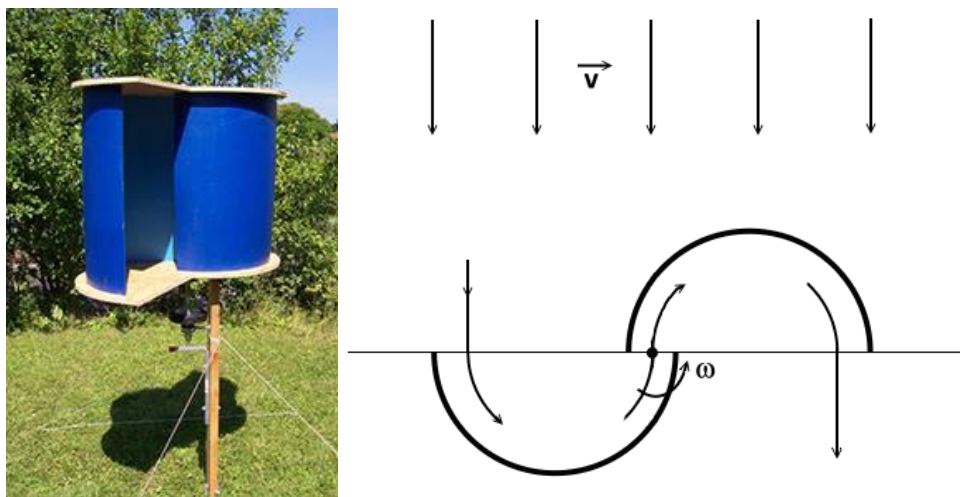
Přístroj pro měření rychlosti větru se nazývá anemometr (obrázek 4). Je složen z mističek ve tvaru polokoule. Vypouklá polokoule má menší odpor než vyduťá polokoule. Poměr odporů při stejné rychlosti větru je až 1:4 [3].



Obrázek 4 Anemometr INT10 [11].

Příkladem odporového motoru je Savoniův motor (obrázek 5). Tento motor si nechal patentovat Savonius Sigurd Johannes roku 1924. Skládá se ze dvou svislých lopatek ve tvaru půl-válce (válec rozříznutý v půli podél osy), které jsou opačně předsazeny. Tyto lopatky jsou k sobě přiblíženy o 20 % průměru rotoru. Přiblížení umožňuje části větru z přední části návětrné lopatky přecházet na zadní stranu závětrné lopatky [12].



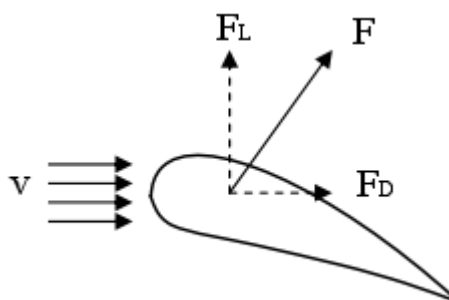


Obrázek 5 Savoniův větrný motor [13] [7].

Součinitel využitelnosti větru větrných odporových motorů se pohybuje v rozmezí 15–23 %, což je důvodem nízkého výskytu těchto motorů v moderní energetické koncepci [7].

### 3.1.2 Větrné motory vztlakové

Princip funkce vztlakových motorů vychází z rovnice kontinuity. Při obtékání profilu lopatky vzdušným proudem vzniká pod profilem oblast zvýšeného tlaku a nad profilem oblast sníženého tlaku. Síly působící na profil jsou znázorněny na obrázku (6). Výslednicí je vztlaková síla, která vyvolává moment síly na rotoru větrného motoru. Vztlaková síla se značí  $F_L$  a je vždy kolmá na nabíhající proud vzduchu. Na profilu vzniká samozřejmě i odporová síla  $F_D$ , která je v poměru k vztlakové síle menší. Výslednou sílu získáme vektorovým součtem těchto sil [4] [14] [8].



Obrázek 6 Síly působící na profil [4].

Vztlaková síla je dána rovnicí (3.1):

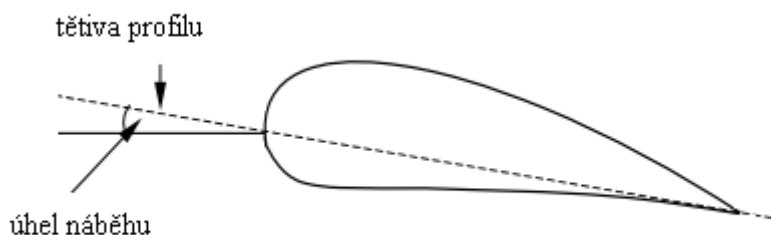
$$F_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_k \cdot v^2 \quad \text{Rov.3.1}$$

Odporová síla se vypočítá pomocí rovnice (3.2):

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_k \cdot v^2 \quad \text{Rov.3.2}$$

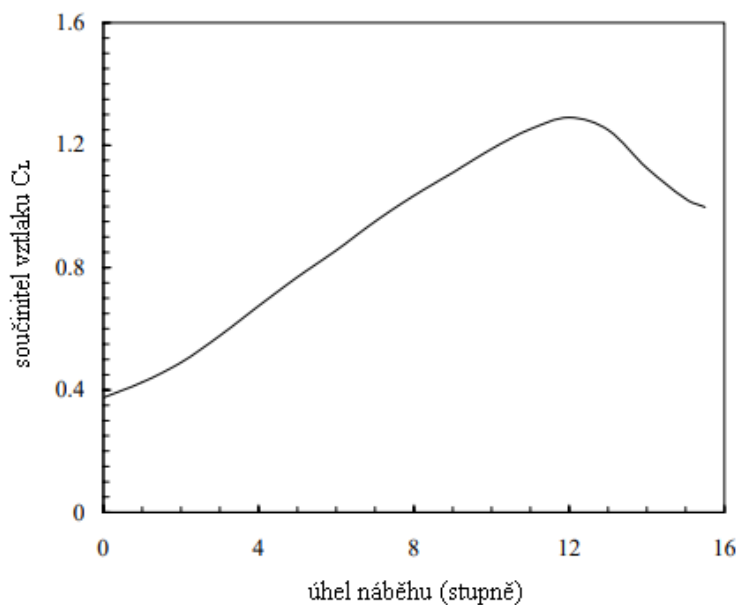
Kde je  $C_L$  součinitel vzlaku,  $C_D$  součinitel odporu,  $\rho$  hustota vzduchu,  $S_k$  plocha křídla a  $v$  rychlost větru.

Úhel mezi tětivou profilu a směrem rychlosti větru se nazývá úhel náběhu (obrázek 7). Tento úhel ovlivňuje vzlakovou a odporovou sílu [4].



Obrázek 7 Úhel náběhu [4].

V grafu (1) lze vidět závislost součinitele vzlaku na úhlu náběhu. S rostoucím úhlem roste hodnota součinitele vzlaku do svého maxima a poté klesá. Této závislosti se využívá při regulaci. Závislost součinitele vzlaku na úhlu náběhu je pro každý typ profilu jiná [4].

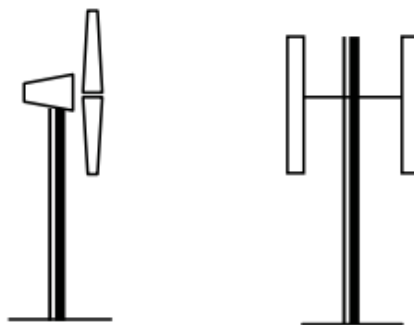


Graf 1 Vliv úhlu náběhu na součinitel vzlaku [4].

Součinitel využití energie větru se u vztlakových motorů pohybuje mezi 40–50 %, a to je důvod proč jsou tyto větrné motory nejrozšířenější [8].

### 3.2 Rozdělení podle orientace hřídele

Dále lze VtE dělit podle orientace hřídele na horizontální a vertikální osou rotace (obrázek 8).



Obrázek 8 VtE s horizontální (nalevo) a vertikální (napravo) osou rotace [4].

#### 3.2.1 Horizontální osa rotace

Osa rotace je uložena horizontálně se zemí a téměř rovnoběžně s prouděním větru. Do této kategorie spadá většina komerčních VtE. Rozběhová rychlost větru se pohybuje okolo 5 m/s. Generátor s převodovkou je umístěn nahoře na stožáru a tím se stává design složitější a konstrukce více nákladná [15].

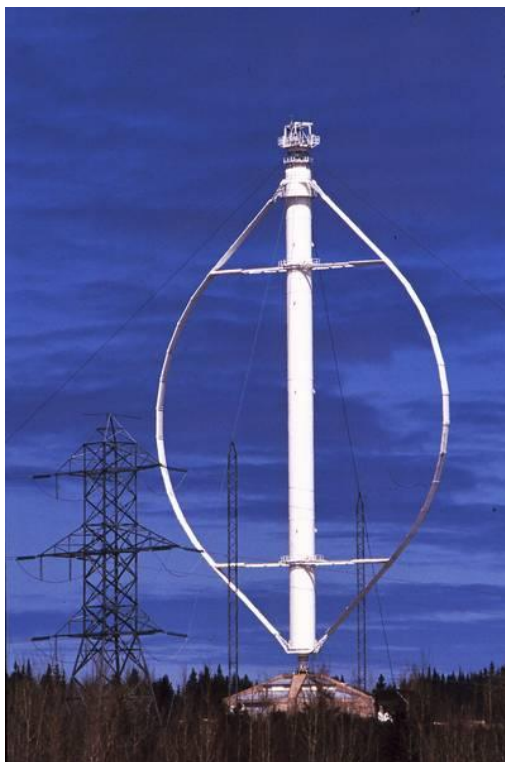
Pro výrobu elektrické energie se zpravidla používají elektrárny s třemi listy rotoru, ale existují elektrárny s dvěma listy, ojediněle i s jedním listem. Třílisté jsou nejrozšířenější pro poměr ceny a výkonu. Přidáním dalšího listu rotoru se zvýší počáteční točivý moment, ale pro následný provoz zde vzrostou i aerodynamické ztráty. Náklady spojené s listem rotoru jsou vysoké a vícelisté rotory se ekonomicky nevyplatí [15].

Na rozdíl od výroby elektřiny, větrná čerpadla potřebují na začátku svého chodu třikrát až čtyřikrát větší počáteční točivý moment. K dosažení tak vysokého počátečního momentu se využívá větrného motoru s větším počtem lopatek, tzv. amerického větrného motoru [15].

#### 3.2.2 Vertikální osa rotace

Převodovka s generátorem může být uložena na zemi pod osou rotace. Mezi největší přednosti (oproti horizontálnímu uložení osy rotace) patří schopnost přijímat vítr z každého směru. Zatím co horizontální VtE se musí pro dosažení největší efektivity natáčet do směru větru [15].

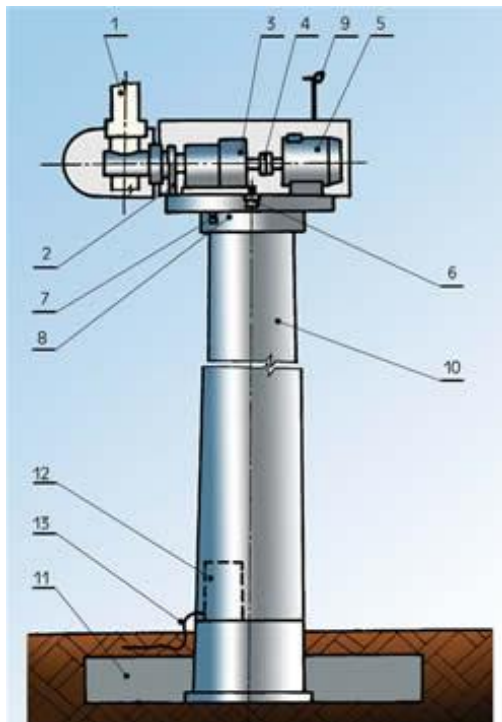
Příkladem VtE s vertikálním uložením osy rotace je Darrieus (obrázek 9). Větrný motor této elektrárny pracuje na principu vztlaku. Hodnota součinitele využitelnosti větru větrného motoru Darrieus se pohybuje v rozmezí 35–38 %. Nevýhodou tohoto větrného motoru je rozběh motoru až při vysokých rychlostech, a proto zde musí být instalován systém, který slouží k rozběhu elektrárny. V praxi můžeme tento motor vidět v kombinaci se Savoniovým motorem, který slouží pro zmiňovaný rozběh při slabších rychlostech větru [4] [16].



*Obrázek 9 Darrieus [17].*

## 4 Základní části konstrukce VtE

Nejrozšířenějším typem větrné elektrárny je VtE vrtulová s horizontální osou otáčení. Hlavní části této VtE jsou stožár, gondola a rotor. Popis částí VtE je na obrázku (10).



Obrázek 10 VtE (1 – větrný motor s rotorovou hlavou 2 – brzda rotoru 3 – převodovka 4 – spojka 5 – generátor 6 – servopohon 7 – brzda strojovny 8 – ložiska 9 – senzor pro snímání rychlosti a směru větru 10 – tubus (stožár) 11 – betonový základ 12 – elektrorozvaděče silnoproudého zařízení a řídicího obvodu 13 – elektrická přípojka) [18].

### 4.1 Rotor

Listy rotoru jsou vyrobeny z kompozitních materiálů, a to metodou laminování. Laminování je postup, kterým prosycováním pojiva přes vrstvy tkaniny vzniká kompozitní materiál. Jako tkanina se používá zpravidla skelná tkanina, avšak v praxi se můžeme setkat i s uhlíkovou či kevlarovou tkaninou. Jako pojivo se používá pryskyřice, která po vytvrzení kombinuje vlastnosti obou materiálů. Přidáním většího množství pryskyřice, než je potřeba, dochází k zhoršení mechanických vlastností [19].

V dnešní době se listy rotoru vyrábí zejména ve speciálních negativních formách. Tvar i přesné vrstvení jednotlivých materiálů je „know-how“ výrobců. K dosažení nejlepších výsledků se používají výpočetní metody konečných prvků [19].

Postupem času se nárok na výkon VtE stále zvyšuje. Se zvyšujícím se výkonem, se zvyšuje i průměr rotoru. V současnosti má jedna z největších VtE instalovaný výkon 8 MW a průměr rotoru 195 m. Konce listu rotoru mohou dosáhnout 10-ti násobku rychlosti větru, což přináší i velké zatížení pro listy rotoru, které musí odolávat velkému namáhání [19] [20].

## 4.2 Regulace

Regulace VtE je nutná proto, aby nedošlo k přetížení generátoru a k jeho poškození. Díky moderním typům regulace lze dosáhnout optimálních otáček při různých rychlostech větru změnou úhlu náběhu větru na listy rotoru.

### 4.2.1 Stall

U regulace Stall jsou listy rotoru spojeny s hlavou pevně v daném úhlu a nemají schopnost se natáčet. Profil listu je aerodynamicky konstruován tak, aby při silném větru docházelo k elastické změně tvaru konce listu. Se změnou tvaru lopatky se změní i úhel náběhu na konci lopatky a dochází k postupnému odtržení proudu vzduchu od lopatky. Výsledkem je snížení vztlaku a tím i pokles výkonu [8].

Nevýhodou regulace Stall je neschopnost rotoru samostatného rozběhu. Rozběh je zde realizovaný elektrickým motorem [8].

### 4.2.1 Pitch

Jedná se o aktivní regulaci. Zatím co technologie Stall má lopatky rotoru ukotvené pevně s hlavou rotoru, technologie Pitch za pomoci hydraulického systému lopatky natáčí. Regulace výkonu Pitch je aktivní v celém rozsahu rychlosti větru. Nejen že snižuje výkon při příliš vysokém větru, ale při slabém větru dokáže natočit lopatky tak, aby se výkon zvýšil. Pro natáčení lopatek se používá krokových motorů [8].

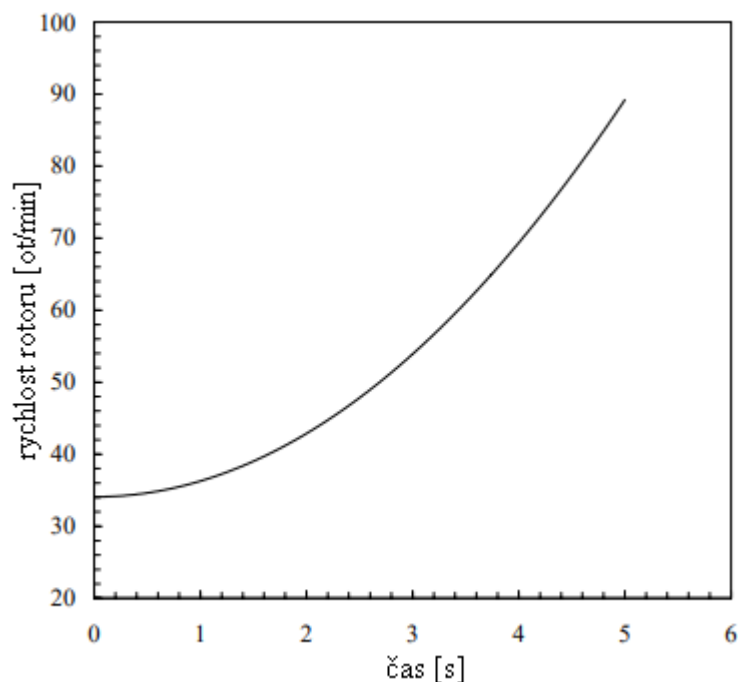
Konstrukce větrných turbín s metodou Pitch je náročnější, ale regulace se dá využít k rozběhu VtE. Největší nevýhoda této metody je poměrně pomalá regulace a při nárazových výkyvech nezabraňuje přetěžování generátoru. Z tohoto důvodu se používá kombinace této metody a metody Stall [8].

### 4.2.1 Active Stall

Rozběh a provoz je při malých rychlostech větru stejný jako u regulace Pitch. Při velké rychlosti větru dojde k natočení lopatek opačným směrem než při regulaci Pitch. Úhel náběhu větru se zvýší, odtrhne se proud vzduchu a sníží vztlak. Tato regulace reaguje na změny rychlosti rychleji, jelikož úhel natočení nemusí být tak velký jako u metody Pitch [8].

### 4.3 Brzda rotoru

Při extrémně vysokých rychlostech větru musí být VtE odstavena z provozu. Dalším důvodem k odstavení VtE je například situace, kdy dojde k poruše elektrické sítě nebo k odpojení generátoru, rychlost rotoru rapidně vzroste a k přetížení dojde během několika sekund. Teoretický nárůst rychlosti rotoru v případě odpojení generátoru je naznačen v grafu (2) [4].



Graf 2 Teoretický nárůst rychlosti v případě odpojení generátoru [4].

K odstavení elektrárny se používá primární systém a v případě selhání tohoto systému se využije k odstavení sekundární systém. Primárním systémem je aerodynamická brzda. U konstrukce VtE Pitch a Active Stall dojde k otočení lopatek o  $90^\circ$ , tím se zabrání vzniku vztlaku a rotor se po několika otáčkách zastaví [4].

Naproti tomu u konstrukce Stall je o  $90^\circ$  otočena pouze špička lopatky. Ta je držena v provozním stavu hydraulickou silou. Při vysokých rychlostech větru se hydraulická síla uvolní a špička lopatky se otočí o  $90^\circ$ . Tím je VtE odstavena z provozu [4].

Jako sekundární systém se používá mechanická brzda podobná těm v dnešních automobilech. Mechanická brzda je třecí zařízení skládající se z brzdového kotouče, třmenu, destiček aktivátoru pružiny a hydraulického ovládání. Za běžného provozu jsou brzdové destičky a kotouč odděleny hydraulickým tlakem. Při nutnosti použít sekundární systém brzd se tlak uvolní a pružina stiskne brzdové destičky proti disku. Brzdové destičky jsou vyrobené ze speciální oceli, aby odolaly vysokému napětí a vysokým teplotám [4].

### 4.4 Převodovka

Úhlová rychlost rotoru VtE se pohybuje v rozmezí 30 – 50 ot/min, zatímco optimální úhlová rychlost generátoru je 1000 – 5000 ot/min. Převodovka se používá k převodu úhlové

rychlosti podle požadavků generátoru. Převodovky pro VtE elektrárny jsou konstruovány s vysokým koeficientem bezpečnosti, jelikož musí odolat rázům, které vznikají při větrných poryvech. Tyto rázy mohou dosahovat několikanásobné hodnoty zatížení, než je standartní hodnota zatížení [4] [12].

Nejpoužívanějším typem je planetová převodovka. K snížení hluku jsou kola kalena, cementována a nitridována. Povrch zubu je pak následně broušen. Pro přenesení velkých výkonů a zachování kompaktních rozměrů se používá vícešupňová nebo několikastupňová kombinovaná převodovka. U kombinované bývá první stupeň planetová převodovky a poslední jeden či dva stupně koaxiální převodovka [12].



Obrázek 11 Převodovka větrné elektrárny od firmy Bosch-Rexroth s označením Redulus GPV pro výkon 2MW. Jedná se o dvoustupňovou planetovou převodovku s výstupním koaxiálním stupněm [12].

## 4.5 Generátor

Generátor je elektrický stroj přeměňující mechanickou práci na elektrickou energii. Skládá se ze dvou částí, kterými jsou rotor (rotační část) a stator (stacionární část).

U větrných elektráren se nejvíce využívají generátory asynchronní (indukční) a synchronní.

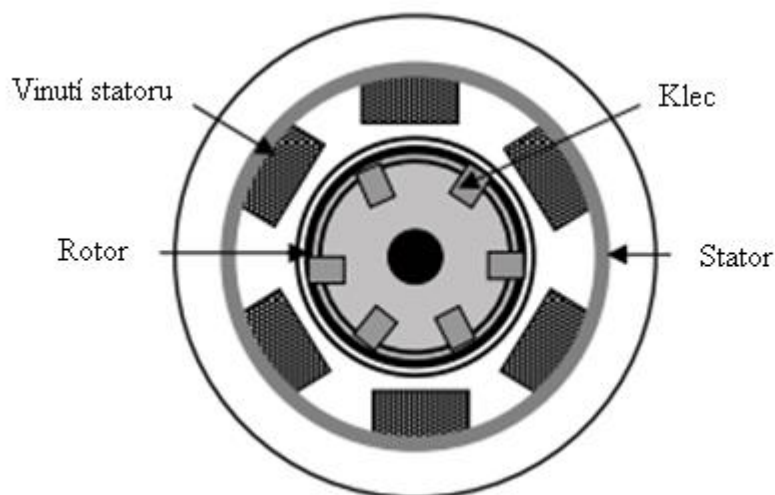
### 4.5.1 Asynchronní generátor

Většina elektráren je vybavena asynchronním generátorem, a to hlavně kvůli jeho kladným vlastnostem jako je jeho působivá účinnost při různých provozních podmínkách, nenáročnost na údržbu a nízká cena generátoru. Průřez asynchronním motorem je na obrázku (12). Asynchronní se nazývá proto, že rychlost magnetického pole statoru je rozdílná, od rychlosti rotoru. S rostoucím počtem pólů rotoru klesá úhlová rychlost rotoru. V tabulce (2) lze vidět hodnoty pro synchronní rychlosti  $n_0$  v závislosti na počtu pólů v 50 Hz síti [4].

Počet pólů	2	4	6	8
$n_0$ [ot/min]	3000	1500	1000	750

Tabulka 2 Závislost synchronní rychlosti na počtu pólů (upraveno) [21].

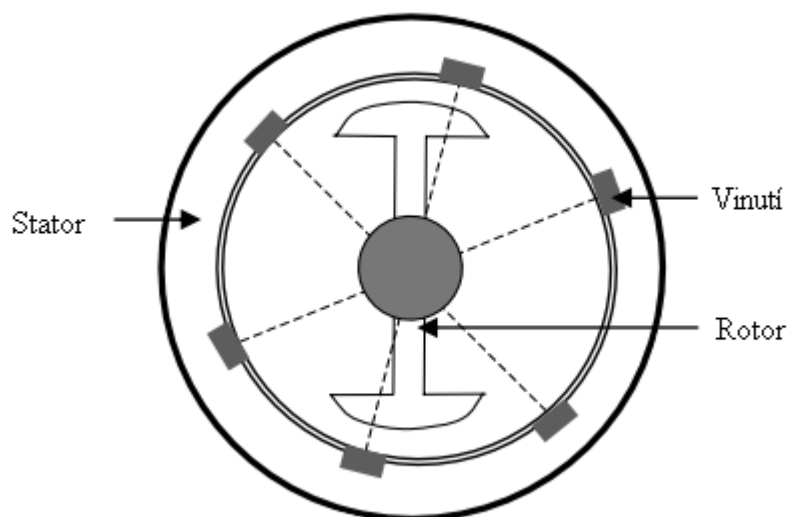




Obrázek 12 Průřez asynchronním motorem [4].

#### 4.5.2 Synchronní generátor

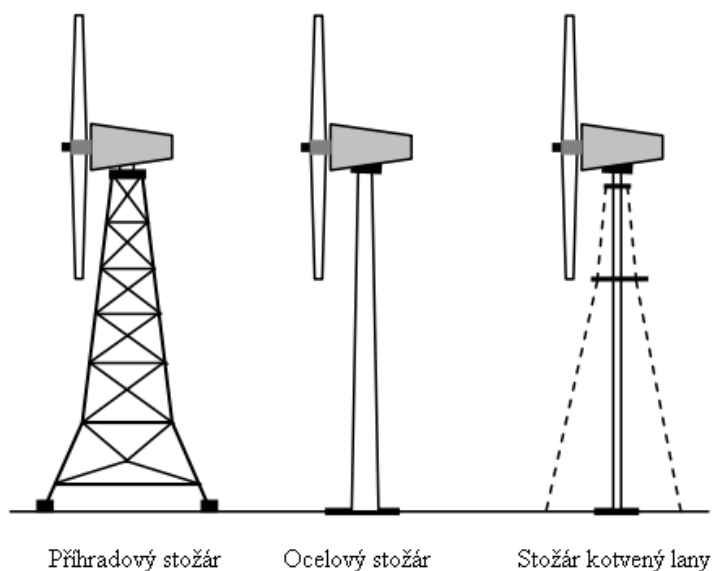
Synchronní generátor v jeho nejjednodušší formě lze vidět na obrázku 13. Skládá se z rotoru a ze třířázového statoru. Rotor a stator mají stejný počet pólů. V rotoru jsou elektromagnety. Mohly by zde být použity i permanentní magnety, avšak ty jsou nákladné a postupem času ztrácí magnetické vlastnosti [4].



Obrázek 13 Průřez synchronním generátorem [4].

#### 4.6 Stožár

Hlavní typy stožárů jsou příhradový stožár, tubusový ocelový stožár a stožár kotvený lany (obrázek 14).



Obrázek 14 Základní typy stožárů [4].

Příhradový stožár je tvořen ocelovými trubkami spojenými do sebe ve strukturu, která je vidět na obrázku. Největší předností tohoto typu je poloviční spotřeba materiálu v porovnání se spotřebou materiálu u tubusového stožáru. A to je hlavním důvodem, proč je stožár příhradový lehčí a levnější. Mezi další výhody patří snadný transport, jelikož montáž probíhá přímo na místě instalace [4].

Tubusové stožáry jsou nejrozšířenějším typem stožárů. Jsou vyrobeny z oceli. Stožár je smontovaný spojením 10-ti až 20-ti metrových částí dohromady v místě instalace. Na části je stožár rozdělen zejména kvůli dopravě. Instalace tubusového ocelového stožáru trvá 2 – 3 dny [4].

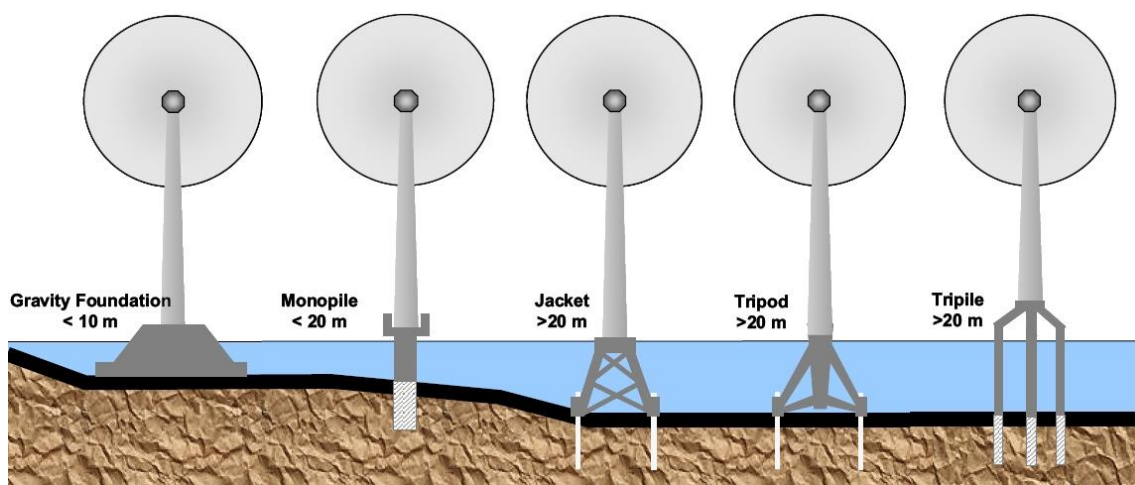
Stožáry kotvené lany se používají zejména pro malé VtE. Charakteristická jsou pro tento typ stožárů ocelová lana, která snižují hmotnost a tím i cenu. Obvykle jsou tyto lana čtyři, ukotvená pod úhlem 45°. Vzhledem ke špatnému přístupu ke gondole není tento typ stožáru rozšířený [4].

V poslední době se začal využívat tzv. prefabrikovaný betonový stožár. Tato technologie je poměrně nová, a rozvíjí se především v Evropě. Stožár je složen z betonových skořepin s vnitřní ocelovou výztuží. Skořepiny jsou rozděleny na segmenty pro usnadnění přepravy. Celý stožár je propojen předepínacími kabely [22].

#### 4.7 Základy

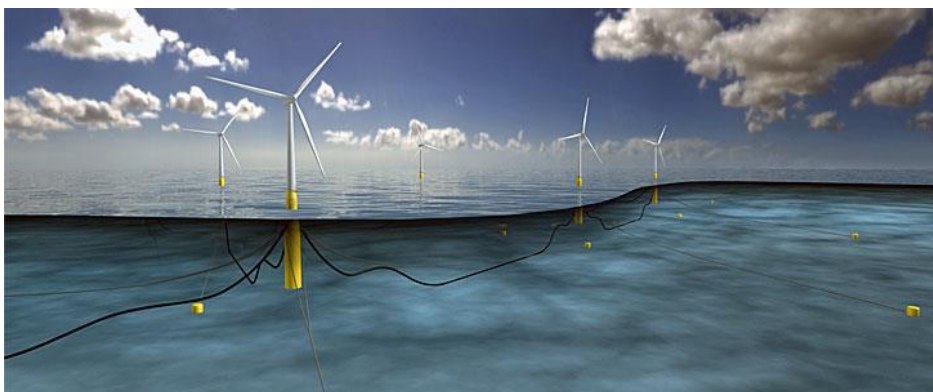
Před zahájením stavby základů je potřeba provést geologický průzkum pro zjištění stability zeminy. VtE představuje vysokou stavbu, a jako taková je náchylná na vychýlení. Pro 2 MW turbínu s výškou stožáru 105 metrů je zapotřebí 500 m<sup>3</sup> betonu a 40 tun ocelové armovací výztuže. Celková hmotnost betonového základu v tomto případě dosahuje hodnoty 1 144 tun [23].

V porovnání s pozemními základy jsou základy pro VtE offshore<sup>1</sup> technicky i finančně náročnější. Jedním z nejstarších způsobů je gravitační uložení. Elektrárna je kotvena hmotností železobetonového fundamentu. Nejčastějším typem je monopile spočívající v založení ocelového tubusu zalitého betonem přímo do dna. Další typ zakotvení tvoří ocelové konstrukce jacket tripod a tripile. Tyto konstrukce jsou po zakotvení na dně vyplněny betonem. Na obrázku 15 jsou zobrazeny příklady typů offshore základů [13].



Obrázek 15 Příklady typů offshore základů. [23].

V poslední době se rozvíjí tzv. plovoucí VtE (obrázek 16). Ty nejsou oproti ostatním typům základů pevně spojeny se zemí, ale plují na vodě. Aby VtE setrvaly na své pozici jsou ke dnu přikotveny třemi řetězy. Zatím co konvenční offshore elektrárny se instalují v moři, jehož hloubka se pohybuje mezi 40-50 metry, plovoucí VtE mohou být i v místech, kde hloubka dosahuje až 800 m [24] [25].



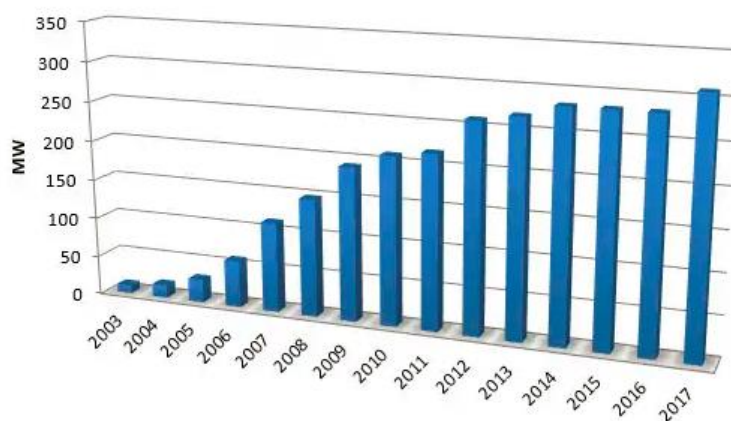
Obrázek 16 Plovoucí VtE Hywind [26].

<sup>1</sup> offshore z angličtiny (v pobřežních vodách) jsou VtE instalované v moři.

## 5 Současnost

### 5.1 Větrná energetika v České republice

V České republice instalovaný výkon VtE postupem času stále roste. I přes stálý růst je v Česku vyrobeno z větrné energetiky pouze 0,6 % z celkové výroby energie. V roce 2016 bylo vyrobeno 83,3 TWh elektřiny brutto. Z toho bylo větrnými elektrárnami vyrobeno 497 GWh. V České republice se koeficient ročního využití výkonu VtE pohybuje zhruba okolo 20 %. V grafu (3) lze vidět růst instalovaného výkonu v ČR [27] [28] [29].



Graf 3 Instalovaný výkon v ČR od roku 2003 do 2017 [29].

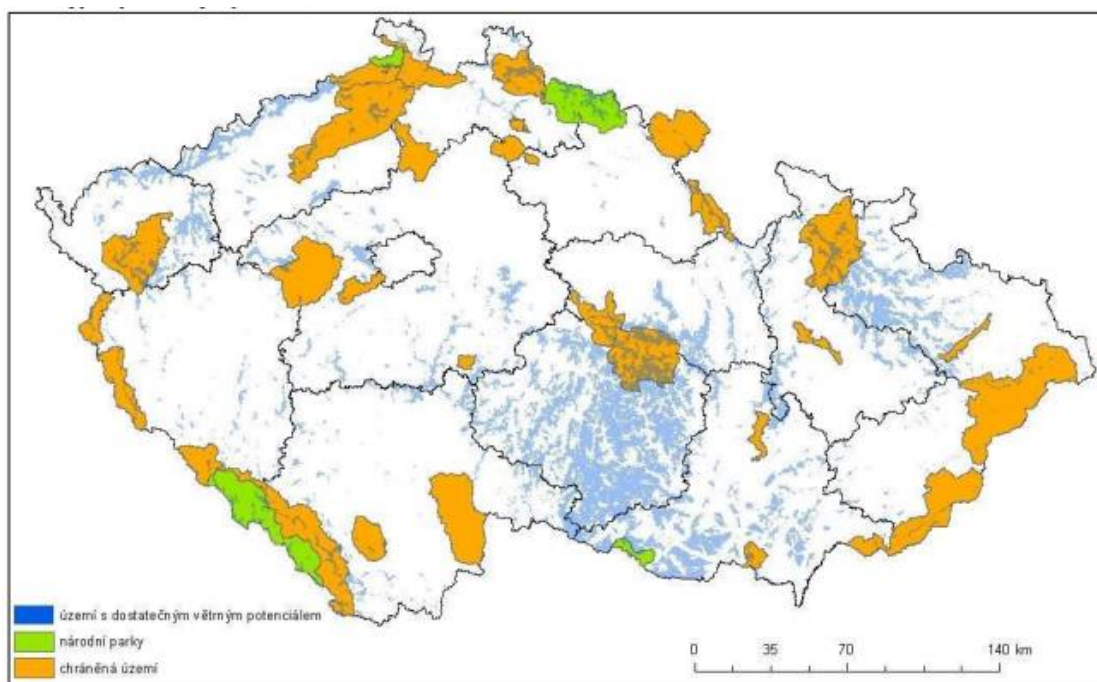
Od roku 2001 jsou výkupní ceny elektřiny, pocházející z VtE, určovány centrálně, a to Energetickým regulačním úřadem (ERÚ). Nárůst cen a garance jejich výše přilákala do větrné energetiky mnoho investorů. V tabulce 2 lze vidět výkupní ceny a zelené bonusy pro jednotlivé roky [30].

Rok uvedení do provozu	Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]
2003	4 009	3 509
2004	3 622	3 122
2005	3 446	2 946
2006	3 146	2 646
2007	3 091	2 591
2008	3 015	2 515
2009	2 750	2 250
2010	2 573	2 073
2011	2 517	2 017
2012	2 462	1 962
2013	2 294	1 794
2014	2 137	1 637
2015	2 060	1 560
2016	1 969	1 469
2017	1 930	1 430

Tabulka 3 Tabulka výkupních cen a zelených bonusu pro roky uvedení do provozu [31].

V České republice je k datu 31.12.2017 instalovaný výkon VtE 308 MW. Kvůli plánovaným odstávkám některých VtE je aktuálně v provozu 303 MW. Největší zastoupení VtE podle výkonu je v Ústeckém kraji.

Na obrázku 17 lze vidět místa s dostatečným větrným potenciálem (modrá barva) pro stavbu VtE. Zeleně jsou zde znázorněny národní parky a oranžově chráněné území. Tato mapa byla vytvořena Ústavem fyziky atmosféry AV ČR. V oblastech s dostatečným větrným potenciálem dosahuje průměrná rychlost větru ve 100 m nejméně 6 m/s [27].



Obrázek 17 Mapa vhodných lokalit v České republice [31].

Podle studie vytvořené Ústavem fyziky atmosféry AV ČR je technický potenciál<sup>2</sup> instalovaného výkonu 28,8 GW, což odpovídá roční výrobě 70,9 TWh z VtE. Ve studii byl také posuzován realistický potenciál větru, a to hned třemi scénáři. V nízkém scénáři, kde se předpokládalo, že podmínky nebudou příznivé, dosahoval instalovaný výkon 991 MW a roční objem vyrobené elektřiny 2,4 TWh. Ve středním scénáři se předpokládalo, že instalovaným zdrojům nebudou bránit zásadní překážky a bude podporován veřejností i státem. Realistický instalovaný výkon v tomto scénáři dosahoval hodnoty 2,3 GW a hodnoty roční výroby 5,9 TWh. Poslední vysoký scénář pracoval s vysokou podporou veřejnosti a státu a potřebou těchto zdrojů energie. Ve vysokém scénáři instalovaný výkon dospěl k hodnotě 6 GW a hodnota roční výroby byla 14,7 TWh. Tato studie byla provedena v roce 2008 a poté částečně aktualizována v roce 2012. Při poslední aktualizaci se zjistilo, že je studie v oblasti s největším větrným potenciálem mírně nadhodnocená, a proto byla částečně upravena. Zmíněné hodnoty jsou po aktualizaci z roku 2012 [27] [32].

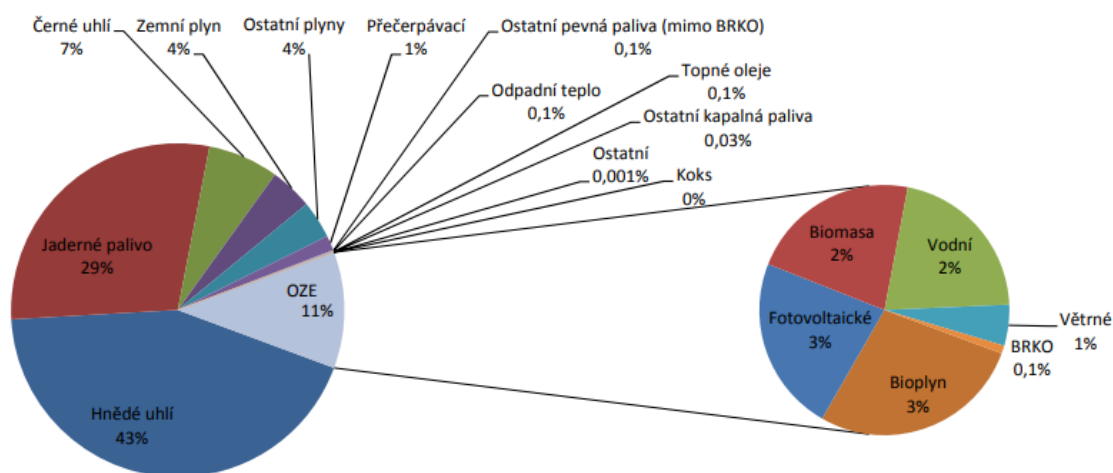
V roce 2015 vypracovala Komora obnovitelných zdrojů svou interpretaci popsanych studií za účasti hlavního autora. Tato studie odvozuje dva scénáře konzervativní a optimistický.

<sup>2</sup> Technický potenciál ukazuje maximální možný rozvoj větrné energetiky při využití současných technických možností a respektování platných legislativních omezení



Konzervativní odpovídá zhruba střednímu scénáři se snížením některých redukčních faktorů, hodnota instalovaného výkonu stoupla na 3,1 GW a roční výroba elektřiny na 9,8 TWh. Druhý optimistický scénář dosahuje hodnot pro výkon 5,8 GW a roční produkce 18,29 TWh [27] [33].

Pro přehled je zde uvedený koláčový graf (4) podílu paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto za rok 2016.



Graf 4 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto – 2016 [28].

## 5.2 Větrná energetika ve světě

Celkový instalovaný výkon z VtE ve světě je přes 539 GW ke konci roku 2017. V tomto roce přibýlo více než 52 GW instalovaných ve větrné energii [34].

Země	Instalovaný výkon VtE [MW]	procenta
Čína	188.2	34.88%
USA	89.1	16.51%
Německo	56.1	10.40%
Indie	32.8	6.08%
Španělsko	23.2	4.30%
Velká Británie	18.9	3.50%
Francie	13.8	2.56%
Brazílie	12.8	2.37%
Kanada	12.2	2.26%
Itálie	9.5	1.76%
Zbytek světa	83	15.38%

Tabulka 4 Instalovaný výkon VtE ve světě [34].

Dánsko bylo po dlouhou dobu lídrem ve větrné energetice. V současné době nalezneme největší instalovaný výkon v Číně, USA, Německu a Velké Británii. Na začátku roku dosáhl instalovaný výkon v Evropě 153,7 GW. Během roku 2016 byl přírůstek instalovaného výkonu 12,5 GW, přičemž z toho 10,9 GW bylo instalováno na pevnině a 1,6 GW na moři [27].

Čína je největším producentem větrné elektřiny, a také jednou ze zemí s nejrychlejším růstem instalovaného výkonu. Přírůstek instalovaného výkonu v roce 2016 činil 19,3 GW.

Celkový instalovaný výkon dosáhl na začátku roku 2017 149 GW. V Číně se pomocí VtE za rok 2016 vyrobilo 241 TWh elektřiny. Koeficient ročního využití výkonu v Číně se pohybuje okolo 20 %. Podmínky v Číně pro růst větrné energetiky jsou velice přívětivé. Rozsáhlé málo obydlené větrné oblasti jsou ideální pro výstavbu velkých větrných farem a vodní elektrárny zase umožňují reagovat na nepravidelnost větrných zdrojů. Problémem je infrastruktura elektrické sítě do vzdálených průmyslových oblastí [27].

Spojené státy měly koncem roku 2016 instalovaný výkon 82,2 GW a v roce 2016 vyrobily 226,5 TWh elektřiny pomocí větrné energetiky, což představovalo 5,55 % z celkové elektřiny vyrobené v USA. Koeficient ročního využití výkonu se ve Spojených státech pohybuje okolo 32 %. Největší větrná farma v USA s instalovaným výkonem 1548 MW je Alta Wind Energy Center v Kalifornii. Spojené státy mají vysoký potenciál zejména na pevnině, ale i v pobřežních vodách [27].

V Německu byl koncem roku 2016 instalovaný výkon koncem roku 50 GW s produkcí 78 TWh a koeficientem ročního využití výkonu zhruba 18,2 % [27].

Koncem roku 2015 byl instalovaný výkon VtE v Dánsku 5,1GW. Tento rok byl velmi větrný a výroba elektrické energie z větru dosáhla 14,1TWh, což odpovídalo 42 % produkce energie. Koeficient ročního využití je zde 32 %. Mimo jiné je Dánsko jedna z prvních zemí, kde začali větrnou energetiku rozvíjet. Dánsko má velice dobré podmínky pro VtE na pevnině, a ještě lepší v pobřežních vodách. S úbytkem volných míst na pevnině se Dánsko stalo průkopníkem rozvoje VtE v pobřežních vodách [27].

## 6 Budoucnost VtE

Na historických datech lze sledovat postupný trend zvětšování. Zvětšuje se instalovaný výkon jednotlivých VtE, jejich výška stožáru a průměr rotoru. V budoucnu lze očekávat stejný průběh, protože i když je v současnosti vhodných lokalit stále dostatek, časem budou ubývat. Pro vytěžení maxima z dané lokality je lepší stavět velké VtE, kterých bude méně než větší počet malých VtE.

### 6.1 Překážky spojené se zvyšováním podílu produkce energie z VtE

S rostoucím podílem VtE na celkové produkci energie bude muset růst i kapacita systému pro akumulaci energie. VtE je proměnlivý zdroj energie, a proto zde musí být instalovaný systém, z kterého lze energii při absenci větru čerpat, a naopak při nedostatečné spotřebě energii ukládat.

K tomuto účelu může být využito například klasické chemické akumulace v lithium-iontových bateriích. Příznivým faktorem je, že cena těchto baterií stále klesá a s tím klesá i cena akumulované energie [35].

Mezi další způsoby akumulace energie patří například přečerpávací elektrárna, setrvačnickové akumulátory, superkondenzátory nebo uložení energie do stlačeného vzduchu.

Další překážkou může být například budování elektrického vedení v místech, kde se elektrické vedení nenachází (např. horské oblasti). Elektrické vedení bude muset být posíleno i v místech, kde se nachází elektrické vedení, ale svými parametry nevyhovuje.

### 6.2 Nové koncepty ve větrné energetice

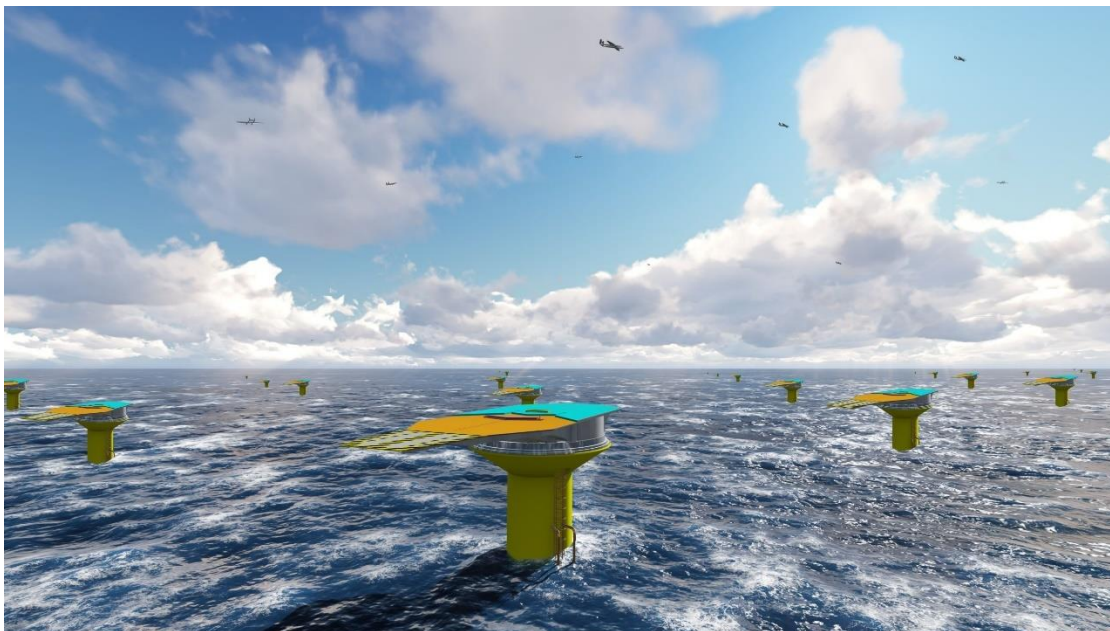
Jednou z myšlenek je integrace VtE přímo do konstrukce budovy. V Londýně byl postaven mrakodrap s třemi integrovanými turbínami do konstrukce budovy. U těchto tří turbín se počítá s využitím Venturiho efektu, a to že se rychlost větru zvýší mezi dvěma vysokými budovami. Proudění je ještě urychleno pomocí „trubky“, ve které je umístěn rotor VtE [36].



Obrázek 18 Strata tower [37].



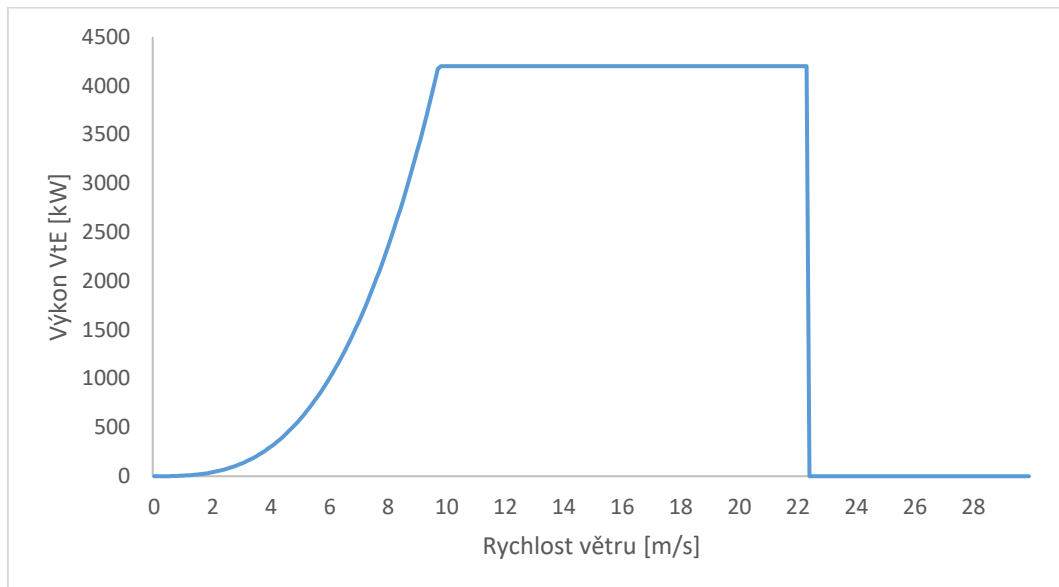
Jeden z netradičních konceptu využití větrné energie je koncept vyrábět elektrickou energii pomocí „draků“. Nejedná se o obyčejné draky ale sofistikované drony plné senzorů a ovládacích systémů. Drak je lanem spojen s generátorem a ten převádí tah draka na elektrickou energii. Drak by mohl létat v řádově větších výškách, než jsou běžně instalovány VtE, a to až 800 metrů, kde může rychlost větru dosahovat 40 m/s [38].



*Obrázek 19 Vizualizace konceptu výroby energie pomocí draků použití systému ampy Power na mori [38].*

## 7 Roční simulace VtE

Pro příklad simulace byla vybrána VtE Vestas V117-4,2MW. Tato VtE má průměr rotoru 117 m a instalovaný výkon 4,2 MW. Její pracovní rozsah rychlosti větru je od 3 do 22,5 m/s, při větších rychlostech je VtE odstavena. Výška umístění osy rotoru je 91,5 m nad zemí.



Graf 5 Vypočítaná výkonnostní křivka VtE Vestas V117 - 4,2MW pro  $c_p=0,45$ .

Jako lokalita byla vybrána přímořská oblast na severu Skotska, severně od města Peterhead (obrázek 20). Meteorologická data pochází z webové stránky viz. zdroj [39]. Tato oblast byla vybrána k porovnání koeficientu ročního využití s nedalekou plovoucí větrnou farmou Hywind. Tato větrná farma je složená z pěti VtE o jmenovitém výkonu 6 MW a průměrem rotoru 154 m [40]. Větrná farma Hywind dosáhla za první tři měsíce (listopad 2017 – leden 2018) využití instalovaného výkonu 65 % [41].



Obrázek 20 Umístění VtE [42].

Jelikož se přes rok mohou v počasí vyskytovat abnormality, například vichřice, počítá se s tzv. meteorologickým rokem. Ten je sestaven tak, že z desetiletého měření v dané lokalitě jsou vybrány měsíce, které vystihují průměrné hodnoty v daném místě. Tabulka (5) znázorňuje, z jakého roku jsou jednotlivé měsíce vybrány.

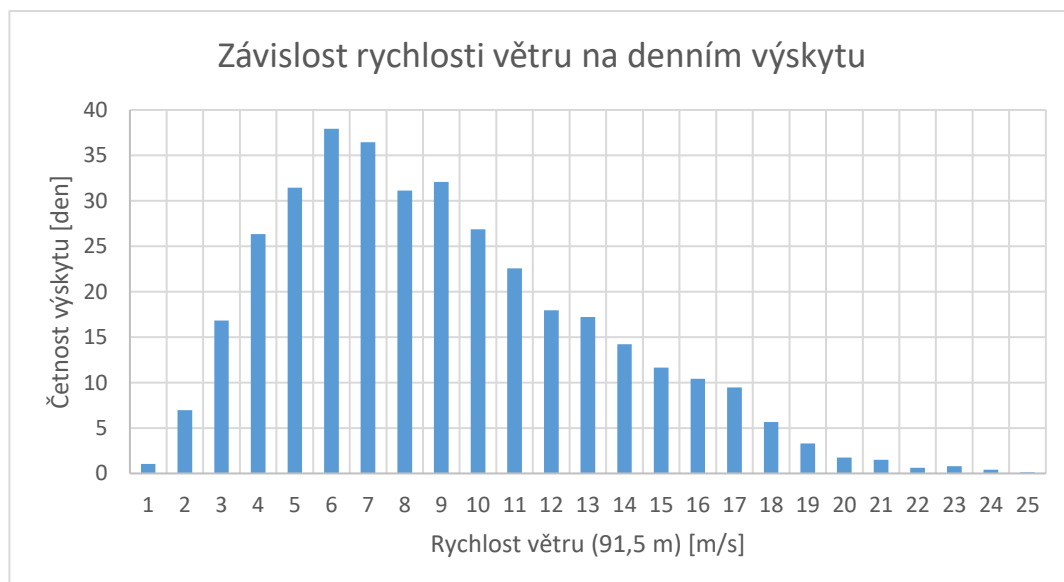
Leden	2009
Únor	2015
Březen	2009
Duben	2014
Květen	2014
Červen	2013
Červenec	2013
Srpen	2011
Září	2010
Říjen	2012
Listopad	2007
Prosinec	2008

Tabulka 5 Výběr měsíců z jednotlivých roků.

Data z meteorologické stanice umístěné ve výšce 20 m nad zemí byly přepočítány pomocí rovnice (2.1) pro výšku rotoru instalované VtE, která činí 91,5 m.

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^a$$

Vzhledem k vybrané lokalitě umístění byl ve vzorci použit exponent  $a = 0,12$ . Následně byla sestaven graf (6) četností jednotlivých hodinových rychlostí v závislosti na dnech. Tento graf udává, kolik dnů v dané oblasti proudil vítr danou rychlostí.



Graf 6 Závislost rychlosti větru na denním výskytu.

Průměrná roční rychlost v daném místě je 8,5 m/s. Tato rychlost je pouze informační, jelikož počítat množství vyrobené energie pomocí roční průměrné rychlosti by bylo nepřesné.

Následně byly z dat průměrné hodinové rychlosti odstraněny rychlosti menší, než je limit pro rozběh VtE a větší, než je hodnota pro odstavení VtE při silném větru. Z takto upravených dat se vychází v dalších výpočtech.

Pomocí vzorce (2.2) bylo z hodinových dat vypočítán výkon.

$$P = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \cdot c_p$$

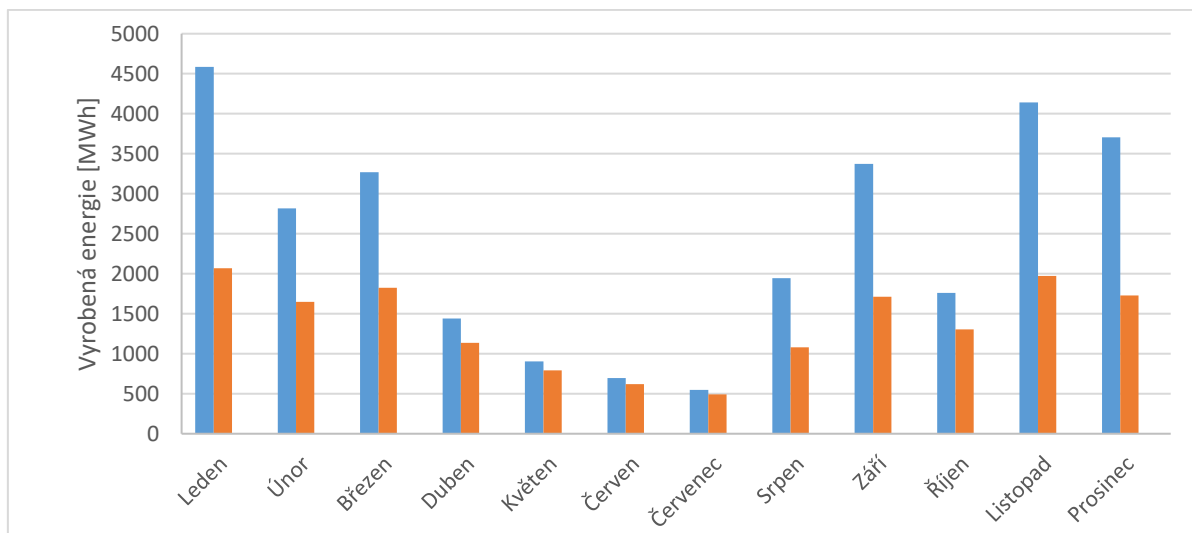
Součinitel výkonosti  $c_p$  není konstantní. Pro zjednodušení je však počítáno s hodnotou součinitelem výkonosti  $c_p = 0,45$ . Hustota byla vypočtena pomocí vzorce (7.1) z dat teploty vzduchu a atmosférického tlaku.

$$\rho = \frac{p}{T \cdot r} \quad \text{Rov. 7.1}$$

Kde  $p$  je atmosférický tlak [Pa],  $T$  je teplota vzduchu [°K] a  $r$  je měrná plynová konstanta pro vzduch  $r = 287,05$  [kg·K]

Sumou vypočítaných výkonů pro jednotlivé průměrné hodinové rychlosti získáme množství vyrobené energie. Výsledná hodnota vyrobené energie větrným motorem je 29,9 GWh. Tato hodnota vyjadřuje potenciální množství vyrobené energie větrným motorem s hodnotou součinitele výkonosti  $c_p = 0,45$ , nevyjadřuje však množství vyrobené energie VtE. Pro dosažení hodnoty vyrobené energie VtE je potřeba výkon pro jednotlivé průměrné hodinové rychlosti vynásobit účinností generátoru (96 %) a účinností převodovky (97 %) a poté odstranit hodnoty větší, než je instalovaný výkon dané VtE. Tyto hodnoty je nutné nahradit hodnotami instalovaného výkonu. Celková energie vyrobená VtE je tedy 16,6 GWh, přitom množství vyrobené energie větrným motorem při koeficientu výkonosti  $c_p = 0,45$  dosahovalo hodnot 29,9 GWh. Tento rozdíl je způsobený tím, že VtE má instalovaný výkon 4,2 MW. Tedy aby nedošlo k poškození generátoru je výkon větrného motoru utlumen.

V grafu (7) lze vidět výrobu elektrické energie v jednotlivých měsících. Modrou barvou je zde vyznačeno teoretické množství energie, které by mohlo být vyrobeno pomocí větrného motoru. Oranžovou barvou je zde vyznačeno množství vyrobené energie VtE s instalovaným výkonem 4,2 MW, účinností generátoru 96 % a účinností převodovky 97 %.



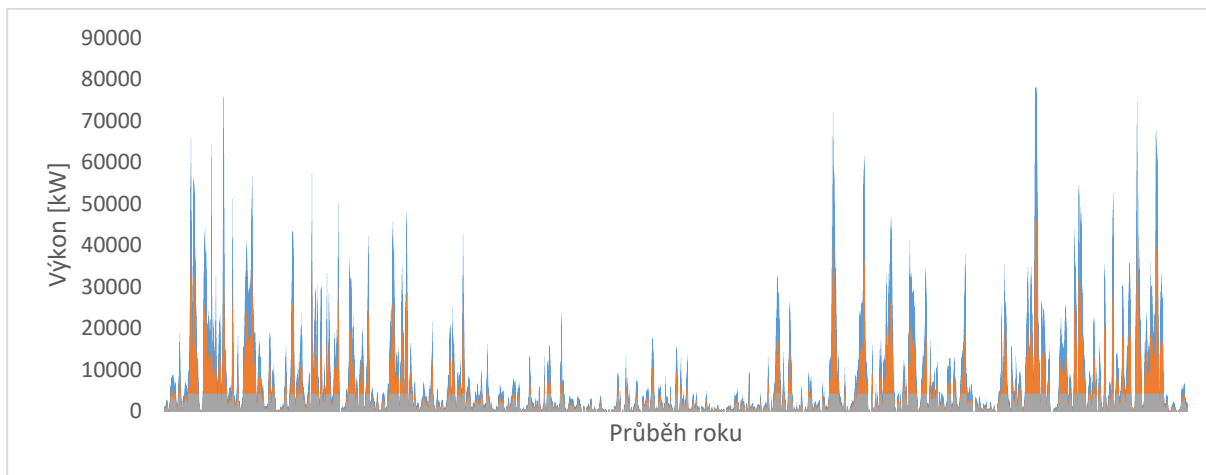
Graf 7 Výroba elektrické energie větrným motorem a VtE za jednotlivé měsíce.

Následně byl pomocí rovnice (2.3) spočítán koeficient ročního využití.

$$k_r = \frac{W_r}{P_i \cdot h}$$

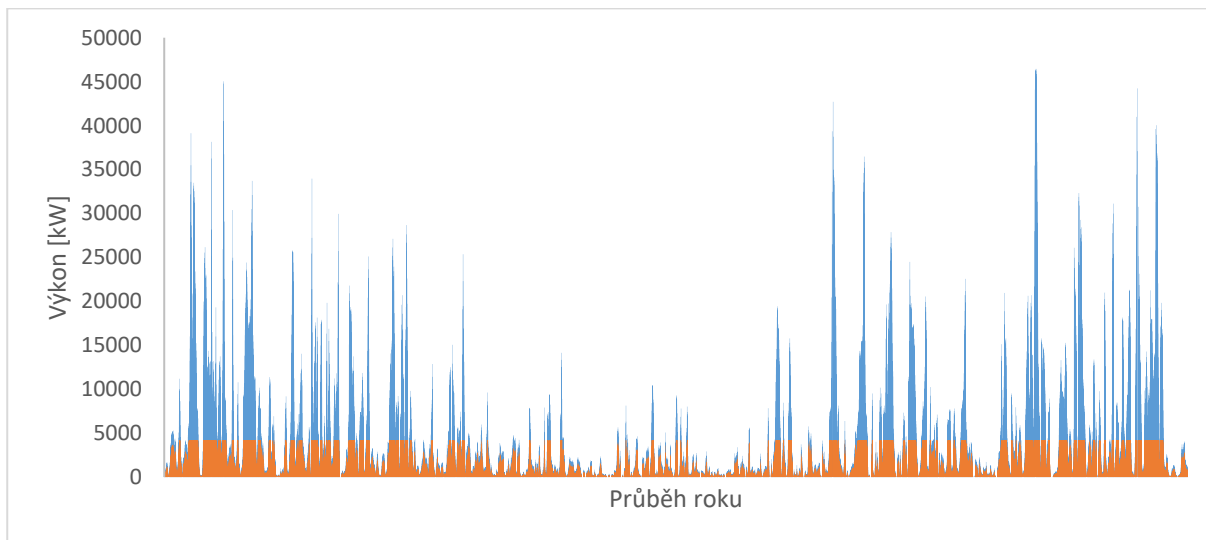
Koeficient ročního využití VtE s instalovaným výkonem 4,2 MW dosáhl hodnoty 45 %. K porovnání s větrnou farmou Hywind byl tento koeficient vypočten pro měsíce listopad až leden. Hodnota koeficientu pro zvolenou VtE za toto období činila 41 %.

V grafu (8) jsou znázorněny hodnoty výkonu v průběhu celého roku pro různé hodnoty  $c_p$ . Modrou barvou jsou vyznačené hodnoty výkonu větru procházející plochou rotoru. Součinitel výkonosti  $c_p = 1$ . Tuto energii nelze z větru odebrat celou, ale jen její část. Oranžová barva představuje maximální možný teoretický výkon větrného motoru a jeho součinitel výkonosti  $c_p = 0,593$  [4]. Šedá křivka udává hodnoty výkonu VtE pro  $c_p = 0,45$ , účinnost generátoru 96 % a účinnost převodovky 97 %.



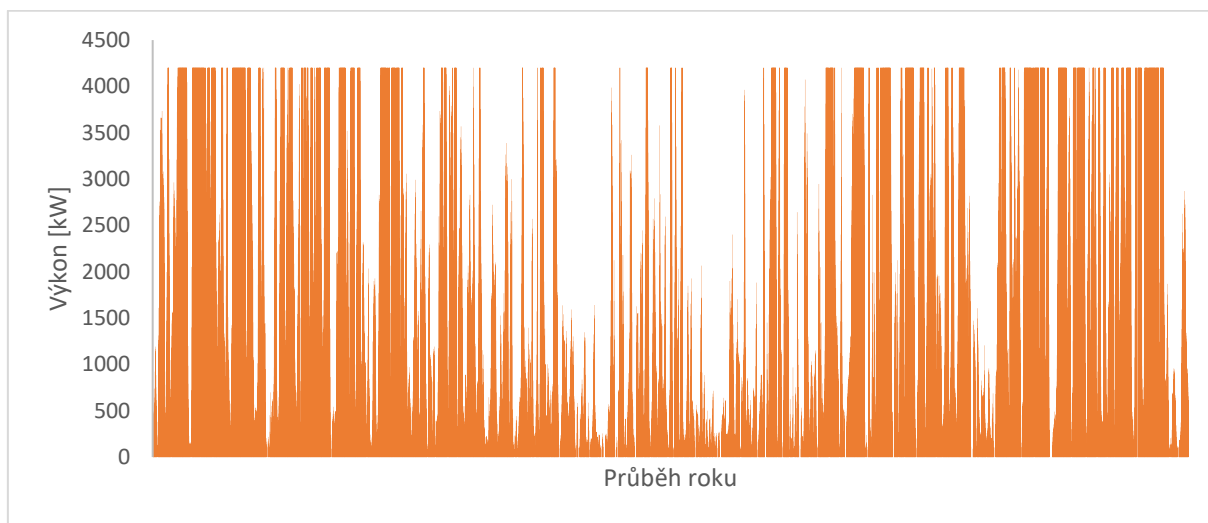
Graf 8 Porovnání výkonu větru, max. výkonu větrného motoru a výkonu VtE v průběhu roku.

V grafu (9) je znázorněn rozdíl mezi maximálním výkonem větrného motoru a výkonem VtE.



Graf 9 Detail Porovnání max. výkonu větrného motoru s výkonem VtE v průběhu roku.

V grafu (10) je znázorněn výkon VtE v průběhu roku.



Graf 10 Detail výkonu VtE v průběhu roku

## DISKUSE

Je těžké odhadnout, co se bude v budoucnosti dít s větrnou energetikou. Má na to vliv mnoho faktorů. Myslím si však, že větrná energetika má na poli výroby energie své místo. Českou republiku podle mého názoru zaspala v budování VtE, nebo přesněji v současné době stagnuje. Jedno procento z celkové výroby energie České republiky je málo.

Ohledně nových konceptů ve větrné energetice jsem skeptický, avšak rozumím nutnosti hledání nových způsobů využití energie větru. Bez vývoje bychom se jako lidstvo nikam neposunuli.

Simulace ročního provozu větrné elektrárny byla spočítána pomocí základních vzorců pro dosažení množství vyrobené energie. Odebrání 100 % energie větru není možné. Jak už bylo zmíněno maximální množství odebrané energie větru rotorem v ideálním případě je 59,3 %, což představuje Betzův limit. V simulaci ročního provozu VtE lze vidět velký rozdíl mezi maximálním množstvím odebrané energie větru a množstvím vyrobené energie VtE. Tento rozdíl je způsoben tím, že generátory VtE dosahují jmenovitého výkonu pro určitou úhlovou rychlost a překročením této rychlosti může dojít k poškození generátoru. Proto je větrnému motoru VtE při vyšších rychlostech větru záměrně zamezeno zvětšení úhlové rychlosti nad ideální úhlovou rychlost pro danou VtE a to změnou úhlu náběhu pomocí natočením lopatek VtE. Změnou úhlu náběhu se změní poměr rychlostí před a za VtE a tím i součinitel výkonosti  $c_p$  který byl v simulaci nahrazen konstantní hodnotou 0,45.

Koeficient výkonosti v praxi není konstantní, avšak na intervalu rychlostí od 3 m/s do 10 m/s odpovídá zhruba hodnotě 45 %, a proto je možné ho nahradit konstantní hodnotou 0,45. Pro průměrné hodinové rychlosti od 10 m/s do 22,5 m/s se začne koeficient výkonosti klesat. Pro tento interval rychlosti dosahuje VtE maximálního výkonu, který činil 4,2 MW. Proto na intervalu od 10 m/s do 22,5 m/s byl výkon VtE nahrazen konstantou 4.2 MW.

Koeficient ročního využití pro zvolenou VtE dosáhl hodnoty 45 %. Pro porovnání s větrnou farmou Hywind byl vypočítán tento koeficient za období listopad až prosinec kde jeho hodnota činila 41 %. Hodnota koeficientu využití větrné farmy Hywind byla 65 % za stejné období. Lze vidět že je na tom větrná farma lépe, avšak i 41 % je pro větrnou elektrárnu na pevnině dostačující. Pro porovnání v České republice dosahuje koeficient ročního využití dosahuje průměrně 20 %.

I přes nízký koeficient výkonosti je výstavba VtE v České republice opodstatněná. Oproti plovoucím větrným farmám mají sice koeficient využití výrazně menší, ten však nevyjadřuje, kolik elektrické energie se vyrobí, nýbrž jaké procento instalovaného výkonu se využije. Off-shore VtE mají sice vyšší koeficient využití, avšak jsou finančně náročnější jak na výstavbu samotné VtE, tak na výstavbu elektrického vedení.

Podle mého názoru má smysl stavět VtE a to i v ČR, jelikož dovedou vyrobit nezanedbatelné množství elektrické energie.



## **ZÁVĚR**

V první kapitole bakalářské práce byla stručně shrnuta historie využívání větru. Byl zde uveden příklad první VtE.

V další kapitole byly rozebrány základní princip funkce VtE. Bylo zde popsáno základní rozdělení proudění, vliv lokality a přepočty rychlosti větru pro požadovanou výšku. Dále byly uvedeny potřebné rovnice pro výpočet výkonu a koeficientu ročního využití. Byl zde zmíněn Betzův limit, který stanoví maximální výkon odebraný větrným motorem z výkonu větru.

Ve třetí kapitole bylo popsáno dělení VtE podle aerodynamického principu na odporové a vztahové a dále podle orientace hřídele rotoru na horizontální a vertikální.

Popis nejrozšířenějších typů VtE vrtulových s horizontální osou rotace je zachycen v kapitole čtvrté. Zde jsou také popsány jednotlivé části VtE s popisem jejich funkce a rozdělení druhů jednotlivých částí VtE.

V kapitole Současnost byl nejdříve popsán stav větrné energetiky v České republice. V České republice je instalovaný výkon VtE 308 MW a za rok 2016 vyprodukovala 497 GWh elektřiny z VtE. Je zde popsán i možný rozvoj, který při středním scénáři dosáhne instalovaný výkon VtE 2,3 GW a výroba energie s tímto instalovaným výkonem bude 5,9 TWh. Následně byla popsána situace ve světě. Největší instalovaný výkon VtE má Čína s 188,2 MW. Druhé místo patří Spojeným státům s 89,1 MW a na třetí příčce je Německo s instalovaným výkonem ve VtE 35,8 MW.

V šesté kapitole byl nastíněn pravděpodobný trend v budování VtE. Z historických dat lze odvodit, že se VtE budou stále zvětšovat jak velikostí, tak i výkonem. Zvětšením VtE lze z daného místa vytěžit více než umístění většího počtu menších strojů. S rostoucím procentem zastoupení VtE na výrobě energie bude potřeba systém pro akumulaci energie. V této kapitole byly taky zmíněny nové koncepty ve větrné energetice, a to instalování VtE přímo do konstrukce budov a vyrábění energie pomocí speciálních draků.

Poslední kapitola se zabývala roční simulací provozu VtE Vestas V117-4,2MW. Jako místo instalace byla zvolena přímořská oblast na severu Skotska, severně od města Peterhead. Toto místo bylo vybráno k porovnání koeficientu ročního využití s nedaleko vzdálenou plovoucí VtE Hywind jejichž koeficient ročního využití dosahoval hodnot 65 % za období od listopadu 2017 až leden 2018.

Celková energie vyrobená VtE Vestas V117-4,2MW dosáhla hodnot 16,6 GWh. Její koeficient ročního využití je 45 %.

Pro porovnání s větrnou farmou Hywind se spočítal koeficient využití pro měsíce listopad až leden a jeho hodnota činila 41 %. Lze vidět, že plovoucí větrná farma má v tomto případě o 24 % větší koeficient využití, avšak hodnota 41 % je u VtE postavených na pevnině taky velmi dobrá. V České republice tento koeficient dosahuje hodnoty kolem 20 %.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOČ, Břetislav. Z historie větrných elektráren. Elektro časopis pro elektrotechniku [online]. 2005, (12) [cit. 2018-01-29]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-vetrnych-elektaren--13364>.
- [2] Vikingové. Dějepis [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.dejepis.com/ucebnice/vikingove>
- [3] J 130 “ADRENALINA“. Sea independent [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.seaindependent.com/yachts/525/j-130.html>
- [4] SATHYAJITH, M. Wind energy: fundamentals, resource analysis, and economics. New York: Springer, c2006. ISBN 978-3-540-30905-5.
- [5] Asa Charles F. Brush wind turbine. In: Voyages scolaires [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://voyagesscolaires.ltett.lu/wp-content/uploads/2014/06/img0.jpg>
- [6] Poul la Cour wind turbine. In: Poul la Cour [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.poullacour.dk/images/forsogsmollerne.jpg>
- [7] CROME, Horst. Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení. Ostrava: HEL, 2002, 144 s. : il. ISBN 8086167194.
- [8] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. : il. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [9] MOLEK, Tomáš. První čtvrtletí provozu plovoucí větrné farmy Hywind předčilo očekávání [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/vetrne-elektrarny/prvni-ctvrtleti-provozu-plovouci-vetrne-farmy-hywind-predcilo-ocekavani/>
- [10] Arizona Nuclear Profile 2010. EIA [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/nuclear/state/arizona/>
- [11] INT10 Anemometer. Kriwan [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.kriwan.com/de/produkte-loesungen/krane/produktuebersicht/produkt/int10-anemometer-10/>
- [12] Převodovka větrné elektrárny. České společnost pro větrnou energii [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/prevodovka-vetrne-elektrarny/327>
- [13] Savoninus. Green desert [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.green-desert.eu/savonius>
- [14] Vznik vztlaku. České společnost pro větrnou energii [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/vznik-vztlaku/307>
- [15] A STIEBLER, M. Wind energy systems for electric power generation. Berlin: Springer, c2008. Green energy and technology. ISBN 978-3-540-68762-7
- [16] LIANG, Xiaoting, Sauchung FU, Baoxing OU, Chili WU, Christopher Y.H. CHAO a Kaihong PI. A computational study of the effects of the radius ratio and attachment angle on the performance of a Darrieus-Savonius combined wind turbine. Renewable Energy [online]. Elsevier, 2017, 113, 329-334 [cit. 2018-04-18]. DOI: 10.1016/j.renene.2017.04.071. ISSN 0960-1481.
- [17] Wind-works [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.wind-works.org/cms/index.php?id=506>

- [18] BERANOVSKÝ, Jiří, Monika KAŠPAROVÁ, František MACHOLDA, Karel SRDEČNÝ a Jan TRUXA. ENERGIE VĚTRU. Ekowatt [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-vetru>
- [19] Výroba rotorového listu větrné elektrárny. Česká společnost pro větrnou energii [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/vyroba-rotoroveho-listu-vetrne-elektrarny/315>
- [20] Největší větrná turbína na světě byla uvedena do provozu. O energetice [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/nejvetsi-vetrna-turbina-svete-byla-uvedena-provozu/>
- [21] Princip asynchronního motoru. Pohonná technika [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/asynchronni-motor/princip-asynch-motoru>
- [22] Prefabrikovaný betonový stožár větrné elektrárny. Česká společnost pro větrnou energii [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/prefabrikovany-betonovy-stozar-vetrne-elektrarny/227>
- [23] Betonová základy. Česká společnost pro větrnou energii [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/betonovy-zaklad/305>
- [24] TZB-info: Větrné elektrárny VIII. – Mořské (offshore) větrné elektrárny. TZB-info [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/15249-vetrne-elektrarny-viii-morske-offshore-vetrne-elektrarny>
- [25] SALAVEC, Jiří. První plovoucí větrná elektrárna zahájila provoz (videopříběh) [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/vetrne-elektrarny/prvni-plovouci-vetrna-elektrarna-zahajila-provoz-videopribeh/>
- [26] HywindScotlandParkOverview. In: Wind power engineering [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.windpowerengineering.com/wp-content/uploads/2015/06/HywindScotlandParkOverview730.jpg>
- [27] WAGNER, Vladimír. Větrné elektrárny včera, dnes a zítra [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/9535-vetrne-elektrarny-vcera-dnes-a-zitra.html>
- [28] Roční zpráva o provozu ES ČR pro rok 2016 [online]. , 1-37 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: [https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2016.pdf/800e5a09-a58a-4a73-913f-abc30cda42a5](https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2016.pdf/800e5a09-a58a-4a73-913f-abc30cda42a5)
- [29] Větrné elektrárny v ČR statistika. Česká společnost pro větrnou energii [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/statistika/281>
- [30] Větrná energie a její využití v České republice. Nazeleno [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/energie/vetrna-energie/vetrna-energie-a-její-vyuziti-v-ceske-republice.aspx>
- [31] Energetický regulační věštník [online]. 22.12.2016, , 1-10 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: [http://www.eru.cz/documents/10540/2824549/161222\\_CR\\_11\\_2016.pdf/e54c452d-3a5d-45c2-b756-ee6aa81bcaa6](http://www.eru.cz/documents/10540/2824549/161222_CR_11_2016.pdf/e54c452d-3a5d-45c2-b756-ee6aa81bcaa6)
- [32] HANSLIAN, David a Jiří HOŠEK. Aktualizovaný odhad realizovatelného potenciálu větrné energie z perspektivy roku 2012 [online]. 18.7.2012, , 1-25 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: [http://www.csve.cz/img/wysiwyg/file/VtE\\_potencial2012.pdf](http://www.csve.cz/img/wysiwyg/file/VtE_potencial2012.pdf)
- [33] CHALUPA, Štěpán a David HANSLIAN. Analýza větrné energetiky v ČR [online]. 1.2.2015, , 1-22 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: [https://www.vlada.cz/assets/ppov/udr-zitelny-rozvoj/vybory-rvur/KomoraOZE\\_analyza-potencial-OZE\\_dilci-VTE\\_log.pdf](https://www.vlada.cz/assets/ppov/udr-zitelny-rozvoj/vybory-rvur/KomoraOZE_analyza-potencial-OZE_dilci-VTE_log.pdf)

- [34] Větrné elektrárny ve světě. Česká společnost pro větrnou energii [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/vetrne-elektrarny-ve-svete/283>.
- [35] SEDLÁK, Martin. Výrobci větrných elektráren se pouští do ukládání energie. Spolupracují také s Teslou. Obnovitelně [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.obnovitelne.cz/cz/clanek/143/vyrobci-vetrnych-elektraren-se-pousti-do-ukladani-energie-spolupracuji-take-s-teslou/>
- [36] Nový londýnský “Elektrický holící strojek”: kde se budoucnost setkává s větrem. Česká společnost pro větrnou energii [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/novinky/69>
- [37] Strata tower [online]. In: . [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d8/Strata SE1 from Monument 2014.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d8/Strata_SE1_from_Monument_2014.jpg)
- [38] ŠVARC, Michal. Dokáží robotičtí draci překonat větrné turbíny ?. EcoFuture [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.ecofuture.cz/clanek/dokazi-roboticti-draci-prekonat-vetrne-turbiny>
- [39] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. European Commission [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html)
- [40] Hywind where the wind take us. Equinor [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.equinor.com/en/what-we-do/hywind-where-the-wind-takes-us.html>
- [41] World class performance by world’s first floating wind farm. Equinor [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.equinor.com/en/news/15feb2018-world-class-performance.html>
- [42] Google Maps [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.google.com/maps>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>Symbol</i>	<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>
$a$	Exponent $a$ závislý na drsnosti povrchu země	—
$C_D$	Součinitel odporu	—
$C_L$	Součinitel vztlaku	—
$c_p$	Součinitel výkonosti	—
$F_D$	Odporová síla	$N$
$F_L$	Vztlková síla	$N$
$h$	Výška	$m$
$h$	Počet hodiny	—
$k_r$	Koeficient ročního využití	—
$P$	Výkon	$W$
$p$	Atmosférický tlak	$Pa$
$P_i$	Instalovaný výkon	$W$
$r$	Měrná plynová konstanta	$kgK$
$S$	Plocha rotoru	$m^2$
$S_k$	Plocha křídla	$m^2$
$S_K$	Plocha křídla	$m^2$
$v$	Rychlost větru	$m/s$
VtE	Větrná elektrárna / Větrné elektrárny	—
$W_r$	Množství vyrobené energie	$Wh$
$\rho$	Hustota vzduchu	$kg/m^3$

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Plachetnice odporová (nalevo) a vztlaková (napravo) [2] [3].	12
Obrázek 2 VtE Charlese F. Brushe [5].	13
Obrázek 3 VtE Paula la Coura [6].	13
Obrázek 4 Anemometr INT10 [11].	16
Obrázek 5 Savoniův větrný motor [13] [7].	17
Obrázek 6 Síly působící na profil [4].	17
Obrázek 7 Úhel náběhu [4].	18
Obrázek 8 VtE s horizontální (nalevo) a vertikální (napravo) osou rotace [4].	19
Obrázek 9 Darrieus [17].	20
Obrázek 10 VtE (1 – větrný motor s rotorovou hlavou 2 – brzda rotoru 3 – převodovka 4 – spojka 5 – generátor 6 – servopohon 7 – brzda strojovny 8 – ložiska 9 – senzor pro snímání rychlosti a směru větru 10 – tubus (stožár) 11 – betonový základ 12 – elektrorozvaděč silnoproudého zařízení a řídicího obvodu 13 – elektrická přípojka) [18].	21
Obrázek 11 Převodovka větrné elektrárny od firmy Bosch-Rexroth s označením Redulus GPV pro výkon 2MW. Jedná se o dvoustupňovou planetovou převodovku s výstupním koaxiálním stupněm [12].	24
Obrázek 12 Průřez asynchronním motorem [4].	25
Obrázek 13 Průřez synchronním generátorem [4].	25
Obrázek 14 Základní typy stožárů [4].	26
Obrázek 15 Příklady typů offshore základů. [23].	27
Obrázek 16 Plovoucí VtE Hywind [26].	27
Obrázek 17 Mapa vhodných lokalit v České republice [31].	29
Obrázek 18 Strata tower [37].	32
Obrázek 19 Vizualizace konceptu výroby energie pomocí draků použití systému ampy Power na mori [38].	33
Obrázek 20 Umístění VtE [42].	34

## **SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Krajiny popsané třídou drsnosti, délkou nerovností a exponentem $\alpha$ [7].....	14
Tabulka 2 Závislost synchronní rychlosti na počtu pólů (upraveno) [21].....	24
Tabulka 3 Tabulka výkupních cen a zelených bonusu pro roky uvedení do provozu [31].....	28
Tabulka 4 Instalovaný výkon VtE ve světě [34]. ....	30

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Vliv úhlu náběhu na součinitel vztlaku [4].	18
Graf 2 Teoretický nárůst rychlosti v případě odpojení generátoru [4].	23
Graf 3 Instalovaný výkon v ČR od roku 2003 do 2017 [29].	28
Graf 4 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto – 2016 [28].	30
Graf 5 Vypočítaná výkonnostní křivka VtE Vestas V 117 - 4,2MW pro $c_p=0,45$ .	34
Graf 6 Závislost rychlosti větru na denním výskytu.	35
Graf 7 Výroba elektrické energie větrným motorem a VtE za jednotlivé měsíce.	37
Graf 8 Porovnání výkonu větru, max. výkonu větrného motoru a výkonu VtE v průběhu roku.	38
Graf 9 Detail Porovnání max. výkonu větrného motoru s výkonem VtE v průběhu roku.	38
Graf 10 Detail výkonu VtE v průběhu roku.	39



## **SEZNAM PŘÍLOH**

- 1 Simulace
- 2 Meteorologická data